

2.2. CALENTAMIENTO POR CORRIENTES DE INDUCCIÓN

2.2.CALENTAMIENTO POR CORRIENTES DE INDUCCIÓN.

Principios fundamentales del calentamiento por inducción. El efecto skin.

El calentamiento por inducción es un sistema eficaz y preciso para el calentamiento de un elemento conductor de la electricidad. En algunos casos es el único método práctico para suministrar calor a una pieza. Es un método limpio, rápido y repetitivo y fácilmente automatizable.

No existe contacto físico entre la pieza y el inductor y el calor aportado se localiza en determinadas áreas o zonas superficiales.

La base del calentamiento por inducción está en la posibilidad de inducir corrientes eléctricas en conductores de la electricidad.

Un inductor es alimentado normalmente mediante una corriente alterna. La corriente varía con el tiempo, normalmente de una forma senoidal. Estas variaciones de la corriente traen como consecuencia variaciones del campo magnético, las cuales provocan corrientes inducidas en la pieza.

Las corrientes eléctricas provocan el calentamiento de la pieza y del inductor. Asociada a la corriente hay una caída repentina de la tensión que viene determinada por la ley de Ohm ($U=I \cdot R$). Cuando se produce una caída de tensión (caída de potencial), la energía eléctrica se transforma en energía térmica (calor). Esta conversión de energía es análoga a la conversión de energía potencial en energía cinética en sistemas mecánicos, tal como ocurre cuando un cuerpo cae por efecto de la fuerza de la gravedad desde una altura dada. En el caso eléctrico, la bajada de tensión produce un calentamiento que viene dado por la expresión $UI=I^2R$. Si la pieza es magnética (por ejemplo aceros a bajas temperaturas) se produce un calor adicional asociado a fenómenos de histéresis; este calentamiento generalmente es pequeño pero si los campos magnéticos son fuertes resulta que el calentamiento debido a la histéresis puede resultar significativo.

Para tener un calentamiento por inducción eficiente se necesitan unas relaciones adecuadas entre la frecuencia del campo magnético (o lo que es lo mismo la frecuencia de la corriente alterna en el inductor) y las características de la pieza que pretendemos calentar. Esas relaciones no son extremadamente críticas y lo que se pretende es tener un cierto grado de efecto skin en la pieza dependiendo de nuestras necesidades de profundidad de temple y dependiendo también del tamaño de la pieza.

El efecto skin es el fenómeno por el cual las corrientes inducidas circulan en una pieza cilíndrica tendiendo a ser mas intensas por la superficie, mientras que las corrientes en el centro son casi cero. De forma similar, para una pieza plana, si la energía está incidiendo desde un lado solamente, las corrientes inducidas son mayores en la superficie. Como consecuencia de esta forma de distribuirse las corrientes, vamos a ser capaces de proporcionar calentamientos superficiales a las piezas. El efecto skin debe estar presente si queremos un calentamiento por inducción eficiente.

Se puede demostrar que las corrientes inducidas disminuyen exponencialmente desde la superficie hacia el interior de la pieza. Además podemos determinar una profundidad efectiva de las capas conductoras de corriente. Esta profundidad, conocida como profundidad de referencia o profundidad skin, d (en cm), depende de:

- la frecuencia de la corriente eléctrica alterna generadora del campo magnético (f en hertzios).
- la resistividad eléctrica de la pieza (ρ en $\Omega \cdot \text{cm}$).
- la permeabilidad magnética relativa de la pieza (μ adimensional).

$$d = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

La profundidad de referencia es la distancia existente entre la superficie de la pieza a inducir y el punto de la pieza en el cual el campo magnético y las corrientes inducidas se reducen al 37% de sus valores superficiales (la densidad de potencia en este punto es un 14% de los valores en la superficie).

La distribución de las corrientes inducidas en una pieza es máxima en la superficie y decrece rápidamente hacia el interior; la penetración efectiva de la corriente aumenta con la disminución de la frecuencia. La distribución de las corrientes inducidas está influenciada también por las características magnéticas y eléctricas de la pieza que debe ser calentada; y a veces estas propiedades cambian con la temperatura, por tanto, la distribución de corriente cambiará durante el proceso de calentamiento.

Como el calentamiento progresa rápidamente hacia el interior por conducción térmica en cuanto la superficie es calentada, la penetración de calentamiento está determinada por el tiempo de calentamiento y por la densidad de potencia (KW/unidad de superficie expuesta al inductor), así como por la frecuencia.

Una máxima densidad de potencia, una mínima duración del calentamiento y una alta frecuencia contribuyen a una mínima penetración del calentamiento.

Circuito eléctrico en la pieza a calentar. Flujos magnéticos.

Cuando se diseña una bobina de inducción se ha de tener en cuenta que, en general, el circuito de corrientes inducidas es una imagen del circuito de la bobina. Para que circule la corriente por la pieza, el circuito de corriente en la propia pieza (imagen del de la bobina) debe ser cerrado, por ello si la distancia entre la entrada y la salida de corriente en la bobina es muy grande es muy posible que no consigamos inducir. Además hay que tener muy presente que la bobina no puede tener tramos paralelos por los que circule corriente en sentidos contrarios, porque en ese caso el campo producido por un tramo se ve contrarrestado por el producido por el otro tramo, impidiéndose de esa forma la inducción de corriente en la pieza.

Intensificadores de campo magnético (ferrita y fluxtrol).

Los intensificadores de campo magnético tienen como función controlar la distribución de corriente en un conductor.

Si en un conductor de sección cuadrada ponemos láminas de ferrita o fluxtrol (intensificadores de campo magnético) en uno de sus lados tendremos como resultado que la corriente se distribuye fundamentalmente por la zona mas alejada de la ferrita. La razón de esto es que en la zona que lleva intensificadores de campo se conduce con mas facilidad el campo magnético y como consecuencia tenemos una mayor inductancia que en el resto, donde la inductancia es mas pequeña. El resultado es que tenemos una mayor circulación de corriente por la zona del conductor opuesta a donde está la ferrita o el fluxtrol.

Si el tubo es hueco y cuadrado tenemos que si ponemos intensificadores de campo en uno de los lados, la corriente tiende a irse por los otros tres lados. Además ocurre que la resistencia del conductor con ferrita o fluxtrol es mayor porque disminuye la sección efectiva de circulación de la corriente.

Como conclusión y resumen podemos decir: *“la corriente circulará por la zona del conductor en que no haya intensificadores de campo”*.

Efecto de la frecuencia sobre fuerzas mecánicas.

Otra razón para una conveniente planificación y elección de la frecuencia es que en los sistemas de calentamiento por inducción las fuerzas mecánicas actúan sobre la carga (pieza). Las fuerzas involucradas son similares a las que se presentan en motores y relés, esto es, entre dos conductores paralelos por los que circulan corrientes, hay una fuerza que es atractiva (corrientes circulando en direcciones opuestas) o repulsivas (corrientes circulando en la misma dirección). Los dos conductores que transportan la corriente en una aplicación de calentamiento por inducción son la bobina y la propia pieza. Las fuerzas son importantes porque tienden a variar la posición de la carga en la bobina si la carga no está centrada y las fuerzas no están equilibradas, o a distorsionar la bobina si ésta no está adecuadamente sujeta.

A bajas frecuencias, las corrientes inducidas son mas profundas y los campos magnéticos mas fuertes para el mismo nivel de potencia, provocando de esa forma fuerzas mas grandes.

Aún cuando una pieza debe estar centrada y, por consiguiente, las fuerzas equilibradas y sin tendencia a expulsar la pieza de la bobina, hay fuerzas desde la carga en dirección radial que repelen a la bobina de inducción. Así las bobinas a bajas frecuencias necesitan fuertes apoyos. A menos que la bobina sea cuidadosamente reforzada, se moverá respecto de la pieza cada vez que se aplique potencia. Esto no sólo distorsiona la uniformidad del entrehierro entre la bobina y la pieza, alterando el modo de calentamiento, sino que también daña a la propia bobina. Una flexión repetitiva debilita gradualmente la bobina y puede ocasionar su rotura.

Ajuste de los inductores.

Podemos considerar que, además del diseño de la bobina, el ajuste de los inductores es uno de los aspectos mas importantes a la hora de conseguir un perfil de calentamiento óptimo en la pieza. Tanto el diseño de la bobina como el ajuste en máquina del inductor, deben perseguir el objetivo de trabajar siempre que sea posible en el centro de las especificaciones de capa y con una eficiencia eléctrica lo mas alta posible. No hay que olvidar que una bobina se diseña siempre para un ajuste determinado, de forma que cuanto peor se haga ese ajuste mas nos desviaremos del perfil de temple óptimo. Es decir, un mal ajuste nos puede provocar una variación sustancial del perfil de calentamiento así como una disminución importante de la eficiencia eléctrica.

Otro aspecto importante a considerar en el ajuste es evitar problemas causados por derivaciones (fallos de tierra) y problemas de cortocircuitos, arcos,... Por esa razón siempre hay que estar muy atentos para que la pieza no roce con la bobina además de asegurarnos de que los aislamientos son correctos y no están deteriorados.

Sistemas de refrigeración de inductores.

Durante el proceso de calentamiento circulan por los inductores intensidades lo suficientemente importantes como para que, unidas al efecto skin (las corrientes a altas frecuencias se distribuyen fundamentalmente por la superficie), provoquen unos calentamientos elevados en la propia bobina de inducción. Como consecuencia de estos calentamientos es totalmente imprescindible refrigerar los inductores. Para la refrigeración de los inductores se utiliza normalmente agua destilada.

La vida de un inductor y la estabilidad de su eficiencia eléctrica dependen en gran medida de una buena refrigeración. Por ello es conveniente tener siempre una refrigeración sobredimensionada, sobretodo en cuanto al caudal se refiere. El calor que el agua del circuito de refrigeración extrae de los inductores debemos eliminarlo para evitar un sobrecalentamiento del refrigerante. Esto lo hacemos intercalando en el circuito un intercambiador de calor cuya misión es extraer el calor del agua destilada. Para que el intercambiador de calor tenga la máxima eficiencia hay que instalarlo en el punto en que el agua destilada tiene la máxima temperatura, esto es, en el tramo comprendido entre la salida de los inductores y el tanque de agua.

Una refrigeración insuficiente puede provocar la rotura de los inductores o puede dar lugar a la aparición de fugas. Por ello es fundamental disponer de sistemas de detección de caudal que nos avise y que impida el calentamiento cuando la refrigeración es insuficiente.